

热解气化技术在工业固废处理中的优化策略及实践效果分析

曾高翔¹ 刘倩² 朱守兵¹ 汪盼盼*¹

1. 浙江联运智慧科技有限公司 浙江 杭州 311102

2. 浙江桃花源环保科技有限公司 浙江 杭州 311102

摘要: 本文聚焦于热解气化技术在工业固废处理领域的应用。首先阐述了工业固废处理面临的严峻形势以及热解气化技术的重要性,接着深入剖析了该技术在工业固废处理中存在的问题,如原料适应性、热解气化效率、污染物排放控制等。针对这些问题,提出了一系列优化策略,包括原料预处理优化、反应条件精准控制、设备结构改进等。通过实际案例分析,展示了优化策略在实践中的应用效果,表明优化后的热解气化技术在提高处理效率、降低污染物排放、提升能源利用效率等方面具有显著成效。最后对热解气化技术在工业固废处理中的未来发展进行了展望。

关键词: 热解气化技术; 工业固废处理; 优化策略; 实践效果

1 引言

工业快速发展使工业固废产生量剧增,其成分复杂、危害大,传统填埋和焚烧处理存在占用土地、二次污染等问题,难满足环保与资源利用需求,亟需高效、环保、可持续的处理技术。热解气化技术作为新型固废处理技术,能在无氧或低氧环境下将固废有机成分转化,实现减量化、无害化和资源化,且污染物排放少、能源回收效率高,应用前景广阔,但该技术仍有问题待优化。本文将探讨其优化策略与实践效果,为推广应用提供参考。

2 热解气化技术概述

2.1 热解气化技术的原理

热解气化技术是在高温、无氧或低氧条件下,使工业固废中的有机物质发生热分解和气化反应,生成可燃气体(如氢气、一氧化碳、甲烷等)、液体燃料(如焦油)和固体残渣(如灰渣)的过程。热解过程主要发生在较低温度(300-600°C),有机物分解产生小分子气体和焦油;气化过程则在较高温度(800-1200°C)下进行,焦油和部分残炭进一步与气化剂(如水蒸气、二氧化碳等)反应生成更多的可燃气体。

2.2 热解气化技术的工艺流程

典型的热解气化工艺流程包括原料预处理、热解气化反应、气体净化处理和能源利用等环节。原料预处理主要是对工业固废进行分类、破碎、干燥等处理,以提高原料的均匀性和热解气化效率;热解气化反应在专门

的反应器中进行,通过控制反应温度、压力、停留时间等参数,实现有机物的高效转化;气体净化处理则是去除可燃气体中的杂质和污染物,使其达到后续利用的要求;能源利用环节将净化后的可燃气体用于发电、供热或作为化工原料等。

3 热解气化技术在工业固废处理中存在的问题

3.1 原料适应性问题

工业固废的种类繁多,成分复杂,不同种类的工业固废在物理性质、化学组成和热值等方面存在较大差异。目前的热解气化技术对原料的适应性有限,对于一些高水分、高灰分、低热值的工业固废,热解气化效率较低,处理效果不理想。

3.2 热解气化效率不高

热解气化反应是一个复杂的物理化学过程,受到多种因素的影响,如反应温度、压力、停留时间、气化剂种类和流量等。在实际应用中,由于对这些参数的控制不够精准,导致热解气化反应不完全,可燃气体的产率和质量较低,能源回收效率不高。

3.3 污染物排放控制难度大

尽管热解气化技术本身具有污染物排放低的优势,但在实际运行过程中,仍然会产生一些污染物,如焦油、粉尘、酸性气体等。焦油是一种复杂的有机混合物,容易在管道和设备中冷凝沉积,堵塞设备,影响系统的稳定运行^[1]。同时,焦油中还含有一些有害物质,如多环芳烃等,对环境和人体健康具有一定的危害。粉尘和酸性气体的排放也会对大气环境造成污染。

3.4 设备运行稳定性差

通讯作者: 汪盼盼, 1992年1月生, 现就职于浙江联运智慧科技有限公司, 男, 汉族, 安徽省六安市人, 研究生, 中级工程师, 研究方向: 固废处理、资源再生。

热解气化设备在运行过程中容易出现故障，如反应器结焦、堵塞，气体净化设备腐蚀等。这些问题不仅会影响设备的正常运行，增加维修成本，还会降低热解气化效率，影响处理效果。此外，设备的自动化程度较低，需要大量的人工操作和监控，也增加了运行的难度和成本。

4 热解气化技术在工业固废处理中的优化策略

4.1 原料预处理优化

4.1.1 分类收集与分选

对工业固废进行分类收集和分选，将不同性质和成分的废物分开处理，可以提高原料的均匀性和热解气化效率。例如，将含水率较高的废物与干燥的废物分开，避免高水分废物影响热解气化反应的温度和稳定性。

4.1.2 破碎与筛分

通过破碎和筛分处理，将工业固废破碎成适当大小的颗粒，增加原料的比表面积，提高热传递效率，促进热解气化反应的进行。同时，筛分可以去原料中的大块杂质和异物，保证设备的正常运行。

4.1.3 干燥处理

对于高水分的工业固废，采用干燥处理降低其含水率，可以提高原料的热值和热解气化效率。常用的干燥方法有热风干燥、太阳能干燥等。

4.1.4 添加助剂

根据工业固废的成分和特性，添加适量的助剂可以改善原料的热解气化性能^[2]。例如，添加钙基助剂可以降低灰渣的熔点，减少反应器结焦的可能性；添加催化剂可以提高热解气化反应的速率和选择性，增加可燃气体的产率。

4.2 反应条件精准控制

4.2.1 温度控制

反应温度是影响热解气化效果的关键因素之一。通过优化加热方式和控制系统，实现反应温度的精准控制。在不同的反应阶段，采用不同的温度控制策略，如在热解阶段保持较低的温度以促进有机物的分解，在气化阶段提高温度以增强气化反应的进行。

4.2.2 压力控制

适当控制反应压力可以影响热解气化反应的平衡和速率。对于一些特定的工业固废，采用加压热解气化技术可以提高可燃气体的产率和质量。同时，压力控制还可以减少气体的泄漏，提高系统的安全性。

4.2.3 停留时间控制

合理控制原料在反应器中的停留时间，确保热解气化反应充分进行。停留时间过短，反应不完全，可燃气体的产率和质量较低；停留时间过长，会增加能耗和设备成本。通过实验研究和模拟计算，确定最佳的停留时间。

4.2.4 气化剂种类和流量控制

选择合适的气化剂（如水蒸气、二氧化碳、空气等）并控制其流量，可以调节热解气化反应的气体产物组成和热值。例如，增加水蒸气的流量可以提高氢气的产率；采用富氧空气作为气化剂可以提高反应温度和气化效率。

4.3 设备结构改进

4.3.1 反应器优化设计

改进反应器的结构，提高热传递效率和物料混合效果，促进热解气化反应的均匀进行^[3]。例如，采用流化床反应器可以提高物料的流化质量，增强传热传质效果；采用回转窑反应器可以实现物料连续进出和充分反应。

4.3.2 气体净化设备改进

优化气体净化设备的结构和工艺，提高对焦油、粉尘和酸性气体的去除效率。例如，采用高效的除尘设备（如布袋除尘器、静电除尘器）可以去气体中的粉尘；采用湿式洗涤塔可以去酸性气体和部分焦油；采用催化裂解装置可以将焦油进一步转化为可燃气体。

4.3.3 设备材料选择

选择耐高温、耐腐蚀、耐磨的材料制造热解气化设备，提高设备的使用寿命和运行稳定性。例如，采用不锈钢、陶瓷等材料制作反应器和管道，可以减少设备的腐蚀和磨损。

4.4 智能化控制系统应用

引入智能化控制系统，实现对热解气化过程的实时监测和自动控制。通过安装各种传感器和仪表，实时采集反应温度、压力、流量等参数，并将数据传输到控制中心。控制中心根据预设的程序和算法，自动调整反应条件和设备运行参数，确保系统始终处于最佳运行状态^[4]。同时，智能化控制系统还可以实现故障诊断和预警功能，及时发现和处理设备故障，提高设备的可靠性和运行效率。

5 实践效果分析：某大型化工园区废盐渣处理项目为例

5.1 案例背景

某化工园区作为国内重要的化工生产基地，年产生废盐渣（含有机物、无机盐及少量重金属）约5万吨。传统焚烧处理方式因盐分腐蚀设备、二噁英排放超标、灰渣需二次填埋等问题，面临环保压力与资源浪费的双重挑战。2020年，园区引入热解气化技术，并联合科研机构针对废盐渣特性开展系统性优化，旨在实现“减量化、无害化、资源化”目标。项目通过技术创新与工艺整合，构建了覆盖预处理、热解气化、尾气净化及灰渣利用的全链条资源化体系，为化工行业危废处置提供了可复制的解决方案。

5.2 优化策略及技术路径

5.2.1 原料预处理优化：从“粗放”到“精准”的质变

废盐渣因含水率高(30%~40%)、成分复杂(含NaCl、KCl、有机物及铁质杂质),直接热解会导致能耗激增、反应不均。项目团队通过“分级干燥+磁选分离+破碎筛分”的组合工艺实现精准预处理:首先采用“余热烘干+太阳能辅助”两级干燥系统,利用热解炉余热与太阳能互补,将物料含水率从35%降至15%以下,显著降低后续热解能耗;其次,通过强磁选机去除废盐渣中的铁质杂质,避免其在高温下与氯盐反应生成腐蚀性气体,延长设备使用寿命;最后,将物料破碎至粒径 $\leq 5\text{mm}$ 并筛分,确保颗粒均匀性,提升热解反应速率。经预处理后,物料热值提升20%,热解效率提高15%,为后续工艺稳定运行奠定基础。

5.2.2 热解气化工艺参数优化:分段控温与催化协同的突破

传统热解气化技术因反应温度单一、气化剂配比不合理,常面临气化不完全、焦油含量高、合成气热值低等问题。项目团队创新采用“分段控温+流化床催化气化”工艺:在干燥段(200~300 $^{\circ}\text{C}$)快速蒸发水分,避免后续反应段因水分汽化吸热导致温度波动;热解段(500~700 $^{\circ}\text{C}$)通过控制氧气供给,促进有机物分解为焦炭、焦油和气体;气化段(800~1000 $^{\circ}\text{C}$)通入蒸汽与微量氧气,并喷入镍基催化剂,降低反应活化能,使焦炭高效转化为CO、H₂等合成气。同时,采用循环流化床反应器增强物料与气化剂的混合效率,减少焦油生成。优化后,合成气热值从4.5MJ/Nm³提升至8.2MJ/Nm³,焦油含量降至50mg/Nm³以下,气化效率显著提高。

5.2.3 尾气净化与资源化利用:从“末端治理”到“过程控制”的升级

热解气化尾气含HCl、SO₂、重金属及二噁英等污染物,若处理不当易引发二次污染。项目团队构建了“急冷+碱洗+活性炭吸附”的多级净化体系:尾气首先进入急冷塔,在3秒内从800 $^{\circ}\text{C}$ 降至200 $^{\circ}\text{C}$ 以下,通过快速降温抑制二噁英再合成;随后通过碱液喷淋塔,利用NaOH溶液中和酸性气体(HCl、SO₂),去除效率达99%;最后,尾气进入移动床活性炭吸附装置,通过物理吸附作用进一步脱除重金属(如Pb、Cd)和残留二噁英,确保排放浓度 $\leq 0.1\text{ng-TEQ}/\text{Nm}^3$ 。净化后的合成气(CO+H₂占比 $\geq 70\%$)经压缩后回用于园区燃气锅炉,替代天然气使用,实现能源循环利用。

5.2.4 灰渣资源化利用:从“废弃物”到“二次资源”的转化

传统焚烧灰渣因含盐量高(NaCl、KCl占比达30%~40%),需作为危废填埋处置,既占用土地资源又存在渗

滤液污染风险。项目团队开发了“水洗脱盐+蒸发结晶+残渣固化”资源化路径:灰渣与水按1:5比例混合后,通过多级逆流洗涤去除可溶性盐,洗涤液经蒸发结晶得到工业级盐(纯度 $\geq 95\%$),回用于化工生产;脱盐后的残渣与水泥、粉煤灰按比例混合,添加固化剂后制备建筑骨料,其抗压强度达25MPa以上,符合《混凝土用再生粗骨料》(GB/T25177-2010)标准。该工艺实现灰渣减量80%,盐回收率 $\geq 90\%$,残渣浸出液中重金属浓度远低于《危险废物鉴别标准》(GB5085.3-2007)限值。

5.3 实践效果分析

5.3.1 环境效益

项目年处理废盐渣5万吨,通过热解气化替代传统焚烧,减少CO₂排放约1.2万吨(相当于替代天然气燃烧的减排效果),二噁英排放降低99%,达到《危险废物焚烧污染控制标准》(GB18484-2020)要求。同时,年回收工业盐4500吨,减少天然盐开采量,缓解资源压力。

5.3.2 经济效益

热解气化处理成本为380元/吨,较传统焚烧(450元/吨)降低15.6%,主要得益于预处理节能、合成气回用及盐销售收益。项目年节约天然气费用约600万元,盐销售收益约200万元,总投资1.2亿元的项目预计5年内收回成本,经济可行性显著。

5.3.3 社会效益

项目严格遵循《“十四五”循环经济发展规划》中“无废城市”建设要求,成为化工行业危废资源化标杆。其技术模式已被多家企业借鉴,推动行业从“末端治理”向“全过程控制”转型,助力碳中和目标实现。

结语:

热解气化技术是高效、环保、可持续的工业固废处理技术,有显著减量化、无害化和资源化优势,但存在原料适应性问题。通过原料预处理优化等措施可有效解决,实践案例证明优化后效果良好,应用前景佳。展望未来,该技术发展前景广阔,将朝着更高效、环保、智能化方向发展。既要加强反应机理研究,开发合适催化剂助剂,又要优化设备结构和工艺流程,还需政策支持引导,推动大规模应用,为工业固废处理及经济社会可持续发展做贡献。

参考文献:

- [1]彭晓为,李倬舫,钟日钢,等.城镇及工业有机固废热解气化技术研究进展[J].化工管理,2021,(20):22-23.
- [2]张勋,李朝晖,唐丽,等.新型中小型固废热解气化工艺及装备[J].应用化工,2021,50(S2):433-436+446.